

РАЗРАБОТКА И ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ГОЛОВНЫХ ОБРАЗЦОВ КОТЛОВ ООО «ИКЗ» ТРЕТЬЕГО ПОКОЛЕНИЯ

ЗАЙЧИКОВ В.Н., инж., ШЕЛЫГИН Б.Л., канд. техн. наук, МОШКАРИН А.В., д-р техн. наук

Представлены особенности и результаты пуско-наладочных испытаний головных образцов котлов марок КВа-0,93ГМ и КВа-2,0ГМ ООО «Ижевский котельный завод».

Ключевые слова: котлы, расчетные характеристики котлов, коэффициент полезного действия, расход топлива.

DEVELOPMENT AND EXPERIMENTAL-INDUSTRIAL RESEARCH OF BOILER LEADING SAMPLES PERFORMANCE OF LC "IBP"

V.N. ZAJCHIKOV, engineer, B.L. SHELIGIN, Ph.D., A.V. MOSHKARIN, Ph.D.

The work represents the peculiarities and the results of start-setting-up tests of boiler leading samples of KVa-0,93GM and KVa-2,0GM types of LC "IBP" ("Izhevsk Boiler Plant") production.

Key words: boilers, boiler estimated performance, efficiency factor.

На основании технического предложения [1], результатов исследований [2] и методики расчета котлов с многопоточной схемой движения теплоносителя [3] на Ижевском котельном заводе были выполнены два проекта и сконструированы котлы марок КВа-0,93ГМ и КВа-2,0ГМ. Были уменьшены ширина газоотводящих щелей с 60 до 40 мм и расстояние между задним и промежуточным экранами с 325 до 260 мм. Шаги труб горизонтальных и вертикальных экранов равны 200 и 220 мм, соответственно. С учетом установки вместо отечественных горелок немецких горелок фирмы Max Weishaupt GmbH, обеспечивающих высокофорсированное сжигание топлива при пониженных габаритах топочной камеры, значения их глубины при проектировании головных образцов принимались на 5–8 % ниже рекомендуемых [3]:

- для котла КВа-0,93ГМ $l_T = 2,0$ м;
- для котла КВа-2,0ГМ $l_T = 2,55$ м.

Значения l_T не превышают значения длины участка стабилизации $l_{yч}$ [4], величины которых равны 2,5 и 3,5 м, соответственно. Согласно [4], для обеспечения надежного спиралеобразного движения воды в трубах с учетом принятой длины $l_{yч}$ для котлов КВа-0,93ГМ и КВа-2,0ГМ значения ширины патрубков-сопел при расходах воды 32 и 60 т/ч приняты равными 95 и 188 мм, соответственно.

С увеличением номера газоотводящих щелей от оси симметрии топочной камеры их длина возрастает в пределах [5]:

- для котла КВа-0,93ГМ $l_n = 0,4–0,8$ м;
- для котла КВа-2,0ГМ $l_n = 0,66–2,6$ м.

Энергоустановки проектировались для двух котельных Завьяловского района Удмуртской Республики при цене природного газа $C_T = 1,45$ руб/м³, стоимости поверхностей нагрева $C_{пов} = 8000$ руб/м² и числе часов использования максимума тепловой нагрузки котлов $\tau_{макс} = 5000$ ч. Установлена целесообразность размещения в вертикальном газоходе дополнительного (второго) конвективного экрана [6]. Значения расчетных характеристик элементов модификаций головных образцов котлов ООО «ИКЗ» третьего поколения с многопоточной схемой движения теплоносителя представлены в табл. 1.

Согласно расчетных формул, ожидаемые значения температуры уходящих газов равны [3]:

- для котла КВа-0,93ГМ $\vartheta_{yx} = 129$ °С;
- для котла КВа-2,0ГМ $\vartheta_{yx} = 144$ °С.

Согласно расчетных формул, ожидаемые значения КПД котла (брутто) равны:

- для котла КВа-0,93ГМ $\eta_k = 91,0$ %;
- для котла КВа-2,0ГМ $\eta_k = 91,8$ %.

Опытно-промышленные исследования выполнялись специалистами пуско-наладочного участка ООО «Электроавтоматика» (г. Ижевск) при участии персонала котельной. Целью испытаний являлись определение режимов работы котлов с составлением режимных карт и оценка возможных значений КПД котлов (брутто) и удельного расхода топлива на выработку тепловой энергии. Определение показателей работы котлов проводилось на четырех относительных тепловых нагрузках в диапазоне 26–100 %.

Таблица 1. Значения расчетных характеристик модификаций головных образцов котлов ООО «ИКЗ» третьего поколения

Наименование характеристик	Марка котла	
	КВа-0,93ГМ	КВа-2,0ГМ
Суммарная длина элементов экранов, м:		
– труб	169	260
– полос	148	226
– пластин	38	48
– ребер	4,5	6,8
Суммарная масса элементов экранов, кг:		
– труб	2890	4440
– пластин	236	300
– полос	231	360
– ребер	5,5	8,8
Масса металла котла, кг	3330	5260
Металлоемкость котла, т/МВт	3,8	2,6
Объем топочной камеры, м ³	2,7	7,8
Суммарная поверхность нагрева, м ²	52,0	120,0

Для оценки неравномерности полей температур, скоростей и состава газов в газоходах производилась тарировка нескольких сечений. На основании этого определялись поправочные коэффициенты для измерения величин рабочих параметров [7–9].

В ходе испытаний периодически проводились замеры рабочих параметров с использованием поверенных приборов (рис. 1). Расход топлива определялся по эксплуатационным приборам [7–9]. Анализ уходящих газов проводился с использованием

электронного газоанализатора марки TESTO-325. Тепловая нагрузка котлов согласовывалась с «Заказчиком».

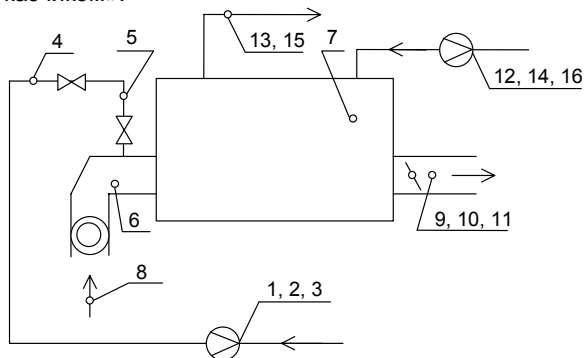


Рис. 1. Схема размещения точек замеров рабочих параметров: 1 – давление газа перед счетчиком; 2 – температура газа перед счетчиком; 3 – расход газа на котел; 4 – давление газа перед котлом; 5 – давление газа перед двойным магнитным клапаном; 6 – давление воздуха перед горелкой; 7 – разрежение в топке; 8 – температура воздуха; 9 – разрежение за котлом; 10 – температура уходящих газов за котлом; 11 – состав уходящих газов за котлом (CO_2 , CO , O_2 , NO_x); 12 – температура воды на входе в котел; 13 – температура воды на выходе из котла; 14 – давление воды на входе в котел; 15 – давление воды на выходе из котла; 16 – расход воды через котел

В качестве горелочных устройств применены вентиляторные горелки немецкой фирмы Max Weishaupt GmbH типа:

- G 9/1-D.DM-80 мощностью 2,5 МВт для котла КВа-2,0ГМ;
- WM-G 10/4 мощностью 1,25 МВт для котла КВа-0,93ГМ.

Методы испытаний и средства измерения рабочих параметров соответствовали техническим требованиям, предъявляемым к опытно-промышленным исследованиям теплоэнергетических установок [7–9].

Общая жесткость воды на входе в котлы составляла 7,3–8,0 мг/кг. В качестве топлива использовался природный газ с характеристиками:

- теплота сгорания $Q_{н}^c = 7980$ ккал/нм³ (33,5 МДж/нм³);
- низшая теплота сгорания, отнесенная к 1 нм³ сухих продуктов сгорания, $P = 1000$ ккал/нм³ (4,19 МДж/нм³);

Таблица 2. Результаты обработки опытных данных, полученных в ходе испытания котла марки КВа-0,93ГМ

Наименование характеристик	Результаты испытаний			
Теплопроизводительность котла Q, МВт	0,26	0,414	0,741	0,93
Относительная тепловая нагрузка q, %	29,0	44,6	80	100
Гидравлическое сопротивление котла ΔP_k , МПа	0,07			
Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах α_{yx}	1,5	1,28	1,23	1,18
Температура уходящих газов ϑ_{yx} , °С	85	98	126	136
Коэффициент, зависящий от температуры уходящих газов и степени их разбавления избыточным воздухом, Z	5,57	5,02	4,84	4,67
Потеря теплоты с уходящими газами q_2 , %	4,57	4,77	5,95	6,21
Потеря теплоты от химической неполноты сгорания топлива q_3 , %	0	0	0	0
Потеря теплоты от наружного охлаждения котла q_5 , %	8,62	5,6	3,13	2,5
КПД котла (брутто) по результатам испытаний:				
– по обратному балансу $\eta_{к.исп}^{обп}$, %	86,8	90,1	93,1	91,3
– по прямому балансу $\eta_{к.исп}^{пр}$, %	87,9	89,7	91,9	91,0
Расход топлива:				
– приведенный к условиям испытаний V_f , м ³ /ч	34,3	53,5	93,5	118,6
– приведенный к нормальным условиям $V_{оп}$, нм ³ /ч	31,9	45,8	87,0	110,3
Удельный расход условного топлива на выработку тепловой энергии b_v , кг у.т./Гкал	154,6	159	153,5	156,5

- максимальное значение концентрации диоксида углерода в сухих продуктах сгорания $\text{CO}_2^{\text{макс}} = 11,8$ %.

Испытания проводились с использованием упрощенной методики теплотехнических расчетов профессора Равича М.Б., предложенной для определения тепловых потерь и составления теплового баланса котлоагрегатов малой мощности [8].

Работы проводились с участием представителей инспекции «Ростехнадзора» с соблюдением утвержденных правил, эксплуатационных и заводских инструкций.

Результаты обработки опытных данных, полученных в ходе испытаний головных образцов агрегатов, представлены в табл. 2 и 3.

В ходе испытаний расходы воды через котлы поддерживались на уровне проектных значений (32 и 60 т/ч). Минимальные значения температуры воды на входе в котлы равнялись 60–70 °С. При максимальных нагрузках котлов 0,93 и 2,0 МВт значения температур воды за энергоустановками составляли 91 и 104 °С, соответственно. С увеличением единичной мощности агрегатов от 0,93 до 2,0 МВт гидравлическое сопротивление водяных трактов находилось в пределах 0,07–0,13 МПа. При температуре наружного воздуха 3–6 °С ее значения перед горелками были равны 20–21 °С. Значения температуры уходящих газов при предельных тепловых нагрузках составляли 136–141 °С (рис. 2), что является нормальным для водогрейных котлов малой мощности.

Согласно результатам испытаний, с увеличением относительной тепловой нагрузки котлов в пределах 26–100 % концентрация диоксида углерода CO_2^f в уходящих газах возрастала от 8–9,3 до 10–10,4 %, а значения содержания кислорода O_2^f снижались с 4,6–7,0 до 2,6–3,2 % (рис. 3). При этом коэффициент избытка воздуха в уходящих газах α_{yx} снижался до значений 1,14–1,18 (рис. 4), соответствующих современным требованиям эксплуатации котлов малой мощности. При концентрации в газах оксида углерода 3–31 ppm величина химического недожога топлива практически отсутствовала ($q_3 = 0$) [8]. При всех тепловых нагрузках концентрация оксидов азота NO_x составляла 40–70 ppm, что отвечало современным экологическим требованиям.

Таблица 3. Результаты обработки опытных данных, полученных в ходе испытания котла марки КВа-2,0ГМ

Наименование характеристик	Результаты испытаний			
	0,56	0,96	1,36	2,0
Теплопроизводительность котла Q, МВт	0,28	0,48	0,68	100
Относительная тепловая нагрузка q, %	0,13			
Гидравлическое сопротивление котла ΔP _к , МПа	1,28	1,24	1,19	1,14
Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах α _{ух}	83	104	121	141
Температура уходящих газов θ _{ух} , °С	4,97	4,8	4,63	4,53
Коэффициент, зависящий от температуры уходящих газов и степени их разбавления избыточным воздухом, Z	4,0	4,51	5,05	6,11
Потеря теплоты с уходящими газами q ₂ , %	0	0	0	0
Потеря теплоты от химической неполноты сгорания топлива q ₃ , %	6,07	3,54	2,5	1,7
Потеря теплоты от наружного охлаждения котла q ₅ , %				
КПД котла (брутто) по результатам испытаний:				
– по обратному балансу η _{к.исп} ^{обр} , %	89,9	91,9	92,5	92,1
– по прямому балансу η _{к.исп} ^{пр} , %	84,1	89,84	93,3	91,8
Расход топлива:				
– приведенный к условиям испытаний V _р , м ³ /ч	75,6	121,8	165,7	247,3
– приведенный к нормальным условиям V _{оп} , нм ³ /ч	71,9	115,4	157,4	235,2
Удельный расход условного топлива на выработку тепловой энергии b _у , кг у.т./Гкал	159,1	155,5	154,0	154,8

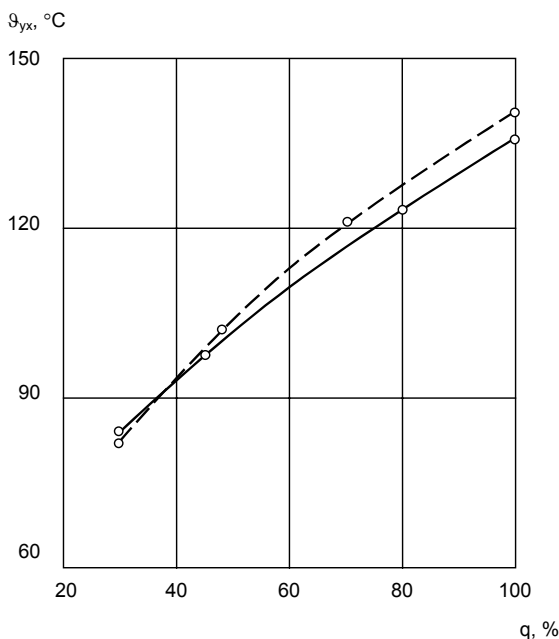


Рис. 2. Изменение температуры уходящих газов в зависимости от относительной тепловой нагрузки котлов: — котел КВа-0,9ГМ; - - - котел КВа-2,0ГМ

При снижении относительной тепловой нагрузки котлов в диапазоне 26–100 % потеря теплоты с уходящими газами q₂ снижалась от 6,11–6,21 % до 4,0–4,57 %, а значения потери теплоты от наружного охлаждения котла q₅ возрастали от 1,7–2,5 % до 6,07–8,62 %, соответственно. В условиях тепловых испытаний за счет повышенных значений q₅ для котла КВа-0,93ГМ его КПД брутто по обратному балансу на 1,2–3,1 % ниже, по сравнению с результатами исследований для котла КВа-2,0ГМ.

Изменения значений КПД брутто по прямому и обратному балансам в зависимости от теплопроизводительности котлов представлены на рис. 5 и 6. Максимальные значения КПД 91,9–93,1 % для котла КВа-0,93ГМ и 92,5–93,3 % для котла КВа-2,0ГМ соответствовали относительным тепловым нагрузкам энергоустановок в пределах 60–85 %.

По результатам промышленных исследований работы головных образцов оформлены режимные и оперативные карты котлов. Удельный расход топлива на выработку тепловой энергии в условиях переменных режимов работы агрегатов составлял 154–159,1 кг у.т./Гкал (36,8–38,0 кг у.т./ГДж).

Для оперативных режимных карт в целях срочной оценки расходов сжигаемого природного газа получены следующие топливные характеристики, нм³/ч:

- для котла КВа-0,93ГМ

$$V_{оп} = 33,4 + 117,1 (Q - 0,26)^{1,05},$$

- для котла КВа-2,0ГМ

$$V_{оп} = 73,9 + 108,9 (Q - 0,56)^{1,07}.$$

Относительное расхождение между значениями расхода топлива согласно топливных характеристик и данными промышленных испытаний не превышает 1,5 %. Сравнение основных результатов промышленных и расчетных исследований работы головных образцов установок при их максимальной теплопроизводительности представлено в табл. 4.

Для котла КВа-2,0ГМ температура уходящих газов, по результатам испытаний равная 141 °С, на 3 °С ниже расчетного значения, что объясняется некоторым превышением площади конвективных поверхностей нагрева, по сравнению с проектным предложением.

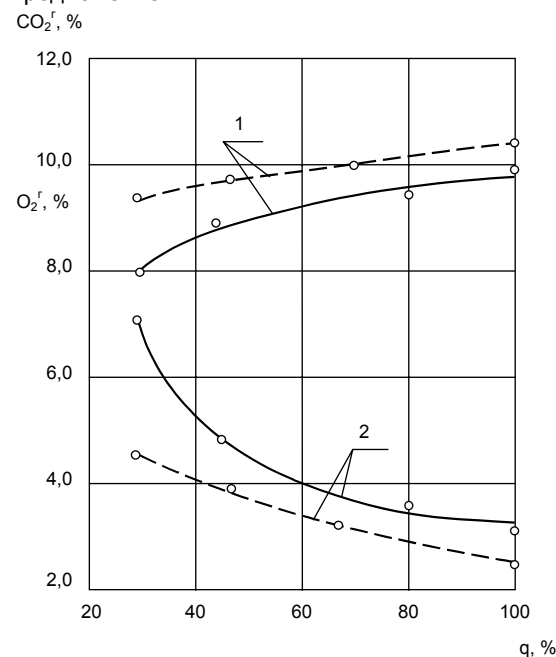


Рис. 3. Изменение значений концентрации диоксида углерода (1) и кислорода (2) в уходящих газах в зависимости от относительной тепловой нагрузки котлов: — котел КВа-0,9ГМ; - - - котел КВа-2,0ГМ

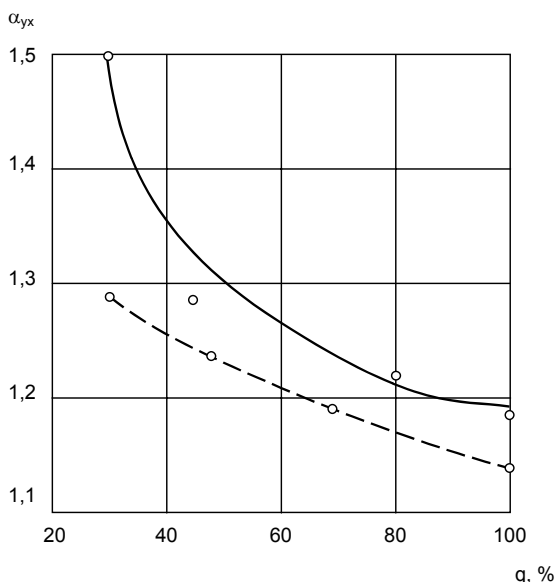


Рис. 4. Изменение коэффициента избытка воздуха в уходящих газах в зависимости от относительной тепловой нагрузки котлов: — котел KVa-0,93ГМ; - - - котел KVa-2,0ГМ

Для котла KVa-0,93ГМ значение $\vartheta_{yx} = 136^\circ\text{C}$ по результатам испытаний на 5°C ниже аналогичного значения для котла KVa-2,0ГМ за счет снижения температуры воды на входе в котел с 75 до 66°C . Опытные значения $\vartheta_{yx} = 136^\circ\text{C}$ на 7°C превышают расчетные величины, что обусловлено снижением площади конвективных поверхностей нагрева при отказе производителя от заднего экрана котла.

При максимальных значениях Q ($0,92$ и $2,0$ МВт) КПД брутто составлял $91,3$ и $92,1\%$, соответственно, что приемлемо для водогрейных котлов малой мощности. По результатам исследований и испытаний значения КПД брутто котла KVa-2,0ГМ $\eta_{к.исс}^{обр} = 91,6\%$ и $\eta_{к.исп}^{обр} = 92,1\%$ превышают аналогичные показатели котла KVa-0,93ГМ на $0,8-0,9\%$, что согласуется с расчетными зависимо-

стями. Абсолютное различие между опытными и расчетными значениями КПД брутто для каждой установки не превышало $0,5-0,6\%$ при относительной погрешности $0,6-0,7\%$.

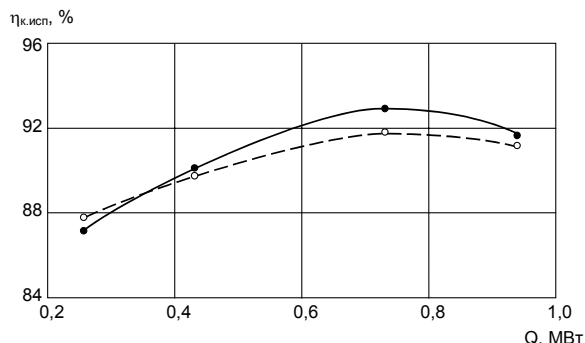


Рис. 5. Изменение КПД котла KVa-0,93ГМ брутто в условиях испытаний при изменении его теплопроизводительности: o – значения по прямому балансу; ● – значения по обратному балансу

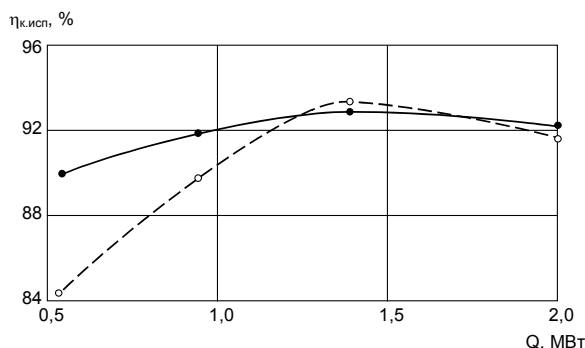


Рис. 6. Изменение КПД котла KVa-2,0ГМ (брутто) в условиях испытаний при изменении его теплопроизводительности: o – значения по прямому балансу; ● – значения по обратному балансу

Таблица 4. Сравнение результатов промышленных и расчетных исследований работы котлов KVa-0,93ГМ и KVa-2,0ГМ при их максимальной теплопроизводительности

Наименование характеристик	Марка котла	
	KVa-0,93ГМ	KVa-2,0ГМ
Теплопроизводительность котла Q, МВт	0,93	2,0
Расход воды через котел D, т/ч	32	60
Температура воды на входе в котел t _{вх} , °С	66	75
Температура воды на выходе из котла t _{вых} , °С	91	104
Температура наружного воздуха t _{нар} , °С	3	6
Температура воздуха в котельном помещении t _в , °С	20	21
Температура уходящих газов ϑ_{yx} , °С:		
– по результатам испытаний	136	141
– по результатам расчетов	129	144
Потеря теплоты с уходящими газами q ₂ , %	6,21	6,11
Потеря теплоты от химической неполноты сгорания топлива q ₃ , %	0	0
Потеря теплоты от наружного охлаждения котла q ₅ , %	2,5	1,7
КПД котла брутто:		
– по обратному балансу (по результатам испытаний) $\eta_{к.исп}^{обр}, \%$	91,3	92,1
– по прямому балансу (по результатам испытаний) $\eta_{к.исп}^{пр}, \%$	91,0	91,8
– по обратному балансу (по результатам расчетов) $\eta_{к.исс}^{обр}, \%$	90,7	91,6
Расход топлива по приборам V _г , м ³ /ч	118,6	247,3
Расход топлива, приведенный к нормальным условиям, V _{оп} , нм ³ /ч	110,3	235,2
Удельный расход условного топлива на выработку тепловой энергии b _y , кг у.т./Гкал	156,5	154,8
b _y , кг у.т./ГДж	37,4	36,9

По результатам испытаний для котла КВа-2,0ГМ удельный расход условного топлива на выработку тепловой энергии равен 36,9 кг у.т/ГДж. Согласно [10], при тепловой нагрузке 2,0 МВт мощность, расходуемая на собственные нужды, составляет 44–45 кВт. При этом удельный расход топлива на отпущенную энергию находится в пределах 39,1–39,6 кг у.т/ГДж. Данные значения согласуются с ранее прогнозируемым показателем (39,2 кг у.т/ГДж).

Проведенный анализ показывает хорошее соответствие показателей котлов, полученных в ходе испытаний головных образцов, результатам ранее выполненных расчетных исследований [2]. Подтверждена правильность принятых технических решений и предложений, установлена надежная и высокоэффективная работа агрегатов. Установки отвечают современным требованиям, соответствующим руководящим документам и существующим правилам эксплуатации котлов малой мощности.

Список литературы

1. **Зайчиков В.Н.** Водогрейный котел // Патент РФ на полезную модель №43344. Бюлл. Открытия и изобретения. 2005. № 1.

2. **Мошкарин А.В., Шельгин Б.Л., Зайчиков В.Н.** Определение условий эффективной работы многопоточного газомазутного котла ИКЗ теплопроизводительностью

2,03 МВт // Энергосбережение и водоподготовка. – 2006. – № 2. – С. 62–66.

3. **Мошкарин А.В., Шельгин Б.Л., Зайчиков В.Н.** Методика расчета газовых котлов ИКЗ с многопоточной схемой движения теплоносителя // Вестник ИГЭУ. – 2006. – Вып. 4. – С. 14–19.

4. **Мошкарин А.В., Шельгин Б.Л., Зайчиков В.Н.** Выбор оптимальных размеров водоперепускных патрубков-сопел экранных труб котлов ИКЗ // Вестник ИГЭУ. – 2007. – Вып. 2. – С. 20–22.

5. **Мошкарин А.В., Шельгин Б.Л., Зайчиков В.Н.** Определение оптимальной длины газоотводящих щелей труб топочных экранов газомазутных водогрейных котлов ИКЗ // Энергосбережение и водоподготовка. – 2006. – № 1. – С. 39–42.

6. **Мошкарин А.В., Шельгин Б.Л., Зайчиков В.Н.** О целесообразности размещения дополнительных экранов в газоходах модернизированных котлов ИКЗ // Энергосбережение и водоподготовка. – 2007. – № 1. – С. 37–40.

7. **Чистяков С.Ф., Радун Д.В.** Теплотехнические измерения и приборы: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1972.

8. **Юренко В.В.** Теплотехнические испытания котлов, работающих на газовом топливе. – М.: Энергия, 1987.

9. **Трембовля В.И., Фингер Е.Д., Авдеева А.А.** Теплотехнические испытания котельных установок. – М.: Энергия, 1977.

10. **Мошкарин А.В., Шельгин Б.Л., Зайчиков В.Н.** Сравнение технических характеристик газомазутных водогрейных котлов ИКЗ // Вестник ИГЭУ. – 2006. – Вып. 2. – С. 44–50.

Мошкарин Андрей Васильевич,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой тепловых электрических станций,
телефон (4932) 41-60-56,
e-mail: admin@tes.ispu.ru

Шельгин Борис Леонидович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций,
телефон (4932) 41-60-56,
e-mail: admin@tes.ispu.ru

Зайчиков Виктор Николаевич,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
инженер кафедры тепловых электрических станций,
телефон (4932) 41-60-56,
e-mail: admin@tes.ispu.ru